Über Vakuumentladungsröhren für hohe Spannungen und Versuche mit hierin erzeugten Kathoden-, Röntgen- und Kanalstrahlen

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

genehmigt von der

Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin

Von

Adnan Waly

aus Cairo

Tag der Promotion: 14. Oktober 1936

Tag der mündlichen Prüfung: 29. April 1936

1936

Druck: Triltsch & Huther, Berlin O 27

430

Referenten: Prof. Dr. A. Wehnelt

Prof. Dr. M. v. Laue

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Längere Zeit herrschte in der Physik die Vorstellung, daß künstliche Kernumwandlungen mittels schneller Korpuskeln nur mit solchen Beschleunigungsspannungen möglich sind, deren Werte größer sind als die entsprechenden Werte der den Kern umgebenden Potentialschwelle. Demnach glaubte man also, daß schon, um in Kerne leichter Elemente eindringen zu können, Spannungen von einigen Millionen Volt gebraucht würden.

Erst Gamow[1]) konnte auf Grund quantenmechanischer Ueberlegungen zeigen, daß eine gewisse — und zwar geringe — Wahrscheinlichkeit besteht, mit beschleunigten Korpuskeln weit geringerer Energie, als der Potentialschwelle entspricht, in den Atomkern zu gelangen. Dies bestätigten auch die bekannten Experimente von Cockroft und Walton[2]), denen es im Jahre 1932 gelang, mit Kanalstrahlen von einigen hunderttausend Volt und später auch mit noch niedrigeren Spannungen Umwandlungen am Lithiumkern vorzunehmen.

Die vorliegende Arbeit ist eine Weiterführung der Versuche von Brasch und Lange[3]), die im Jahre 1926 mit experimentellen Vorbereitungen zur Atomzertrümmerung mittels hoher elektrischer Spannungen begonnen hatten, also zu einem Zeitpunkt, als man noch der Auffassung war, daß zu künstlichen Kernumwandlungen Spannungen von mehreren Millionen Volt nötig seien. Aber auch nach den Arbeiten von Cockroft und Walton bestand doch noch ein Interesse, auch für kernphysikalische Zwecke die Technik des Arbeitens mit Spannungen von mehreren Millionen Volt an Entladungsröhren zu verbessern, und zwar aus folgenden Gründen:

Erstens schien es nicht ausgeschlossen, auch mit anderen Strahlen als mit Kanalstrahlen Umwandlungen vorzunehmen, wobei man natürlich an die Verwendung schneller Elektronen und harter Röntgenstrahlen dachte. Zweitens wird bei Kanalstrahlen mit steigender Spannung die Ausbeute von Kernumwandlungen größer, und es bestand Aussicht, mit Kanalstrahlen höherer Spannung auch in schwerere Kerne einzudringen.

Besonders die Bearbeitung des erstgenannten Punktes, ob mit Kathoden- und Röntgenstrahlen Kerneffekte erzielbar sind, bildet den hauptsächlichen Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen. Außerdem erwies sich die Beseitigung von Mängeln

---

[1]) Gamow, Zs. f. Phys. 52, 510 (1928).
[2]) Cockroft und Walton, Nature, 129, 242, 649 (1932).
[3]) Brasch und Lange, Zs. f. Phys. 70, 10 (1931).

der von Brasch und Lange entwickelten Entladungsröhren in Bezug auf Konstanz und Lebensdauer als nötig, und schließlich wurden die Eigenschaften der in diesen Röhren erzeugten Strahlen untersucht und genauer nachgeprüft, insbesondere die schneller Kathodenstrahlen. Vorzugsweise die beiden letzten weniger prinzipiellen Punkte, die aber gerade für die medizinischen und technischen Anwendungen dieser Strahlen von Bedeutung sind, nahmen einen großen Teil der zur Verfügung stehenden Zeit in Anspruch.

Betrieb und Weiterentwicklung von Entladungsröhren.

Es soll zunächst kurz noch einmal auf die Entwicklung der Entladungsröhren und Hochspannungsanlagen bis zum Beginn dieser Arbeiten eingegangen werden. Vor den Arbeiten von Brasch und Lange gab es in der Technik nur einstufige Entladungsröhren, die Spannungen bis zu 200—300 Kilovolt aushielten. Bei Belastung dieser Röhren mit höheren Spannungen setzte eine selbständige Entladung ein, die die Spannung begrenzte oder sogar zur Zerstörung der Röhren führte. Da man glaubte, daß die Ursachen für diese Erscheinung Vorgänge im Vakuum seien, versuchten einige Physiker, als erster wohl Coolidge, diese Schwierigkeiten dadurch zu umgehen, daß sie mehrere Röhren hintereinander schalteten, von denen jede nur mit einem Bruchteil der Gesamtspannung belastet wurde. Dabei durchliefen also die beschleunigten Korpuskeln nacheinander getrennte Felder und erhielten so eine Beschleunigung, die der Summe der angelegten Teilspannungen entsprach. Solche komplizierten Anordnungen führten zu gewaltigen Rohrdimensionen und zu sehr starken Intensitätsverlusten.

Brasch und Lange konnten nun zeigen, daß bei dem Prozeß der Spannungsbegrenzung nicht der Vakuumraum, sondern wesentlich die Rohrwandung beteiligt war. Sie fanden, daß das Wesen der Spannungsbegrenzung in Folgendem begründet liegt: In einem Entladungsrohr setzt an Stellen hoher tangentialer Feldstärke bei einer gewissen Höhe derselben eine Elektronenverschiebung an der Innenoberfläche der Wand ein. Diese Verschiebung wächst lawinenartig an, wobei die Elektronen aus der Wandoberfläche immer größere Geschwindigkeiten annehmen und schließlich dann in den Vakuumraum austreten. Dadurch setzt eine Entladung ein, die einen Zusammenbruch des Feldes zur Folge hat. Außerdem treten durch das Vortragen des Feldes an der Innenwand des Entladungsrohres an gänzlich unerwarteten Stellen große Feldstärken quer zum Wandmaterial auf. Dadurch wird das isolierende Wandmaterial sehr oft zerstört, das solchen hohen Belastungen nicht gewachsen sein kann.

Beseitigen ließ sich diese Gleitentladung entweder durch metallische Unterteilung der isolierenden Wandflächen oder durch Vergrößerung der Gleitwege. Das letztere ergibt aber im allgemeinen eine Vergrößerung der Dimensionen des Rohres. Schließlich ergab sich die Konstruktion des sogenannten Lamellenrohres, das eine besonders konsequente Unterteilung der Rohrwandungen bei gleichzeitiger Vergrößerung der Gleitwege, aber o h n e Vergrößerung der Dimensionen des Rohres erlaubt.

Das Lamellenrohr (Bild 1) besteht aus einer Aufschichtung von Ringscheiben, die abwechselnd aus metallischen und isolierenden Materialien hergestellt sind. Zwischen den Ringscheiben befinden sich Gummiringe, die zur Vakuumdichtung und als

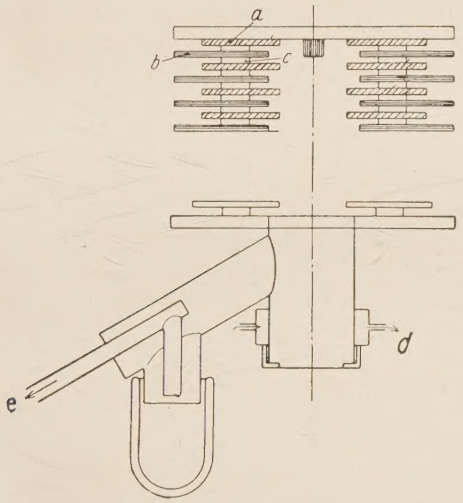


Bild 1.

Schematische Darstellung des Lamellenrohres.

a Metallscheiben, b Scheiben aus Isoliermaterial, c Gummiringe, d Kühlwasserabfluß, e Anschluß zur Pumpe.

Abstandswahrung dienen. Wie aus Bild 1 zu ersehen ist, haben die Gummiringe einen größeren Innendurchmesser als die Isolierscheiben, wodurch der erwähnte große Gleitweg gegeben ist. Ein durch die relativ kleine Dimensionierung des Lamellenrohres ermöglichter äußerer Ueberschlag in Luft konnte natürlich leicht dadurch verhindert werden, daß das gesamte Entladungsrohr in einem großen ölgefüllten Isolierzylinder untergebracht war.

Zur Zeit des Beginns der Arbeiten von Brasch und Lange, also vor Klarstellung des Entladungsrohrproblems, standen keine Hochspannungsanlagen für einige Millionen Volt zur Ver-

fügung. Sie versuchten deshalb, mittels der atmosphärischen Gewitterelektrizität in diesen Spannungsbereich vorzustoßen. Sobald es aber möglich war, mit genügend leistungsfähigen künstlichen Hochspannungsquellen zu arbeiten, wurden diese dann natürlich vorgezogen wegen der jederzeit bestehenden bequemen Arbeitsmöglichkeit.

Die erste technische Hochspannungsanlage für mehrere Millionen Volt war der Stoßgenerator, der auf dem Marx'schen Prinzip der Spannungsvervielfachung beruht. Hierbei wird eine Anzahl von Kondensatoren parallel über große Widerstände aufgeladen und dann über Funkenstrecken hintereinander geschaltet. Man erhält damit eine der Anzahl der Kondensatoren entsprechende Vervielfachung der angelegten Ladespannung. Mit dem Stoßgenerator kann man sehr kurz andauernde Spannungsstöße großer Höhe und Energie erzeugen.

Abgesehen von der Tatsache, daß eine solche Stoßanlage die erste künstliche Spannungsquelle für mehrere Millionen Volt war, die zur Verfügung stand, bietet der Betrieb mit Stoßspannung vielerlei Vorteile, die für das Arbeiten mit Entladungsröhren von großer Bedeutung sind. Die verschiedensten Isolatoren haben gegenüber Gleich- und Wechselspannung bei Belastung mit kurzzeitigen Stoßspannungen wesentlich größere Durchschlagsfestigkeiten, die eine kleinere Dimensionierung gestatten. Ebenfalls sind Spitzenschlagweiten und Gleiterscheinungen geringer. Endlich spielen bei solchen Spannungsstößen von einigen Tausend Ampere Stromstärke Sprühverluste von selbst einigen Ampere keine Rolle, die dagegen natürlich bei kontinuierlicher Stromstärke von der Größenordnung eines Milliampere — was der gleichen mittleren Stromstärke bei der praktisch vorkommenden Funkenfolge entspräche — die Aufrechterhaltung der Spannung unmöglich machen würden.

Die Untersuchungen wurden an denselben Anlagen ausgeführt, die zu den ersten Versuchen Brasch und Lange zur Verfügung standen, nämlich an der 2,4 Millionen Volt-Anlage im Hochspannungslaboratorium der Transformatorenfabrik der AEG in Oberschöneweide, und an einer kleineren Anlage, die ursprünglich ca. 900 Kilovolt lieferte und dann im Verlauf dieser Arbeit auf etwa 1,1 Millionen Volt vergrößert wurde.

Die große Anlage besteht aus 12 Stufen von je 48 000 cm Kapazität und ergibt dementsprechend eine Endkapazität von ca. 4 000 cm. Die Ladespannung beträgt maximal 200 Kilovolt, die Endspannung somit etwa 2,4 Millionen Volt. Bei den gegebenen Ladewiderständen ist die Halbwertsdauer der Eigenentladung ungefähr 200 Mikrosekunden bei einem Spannungsanstieg von etwa 0,5 Mikrosekunden. Es sei bemerkt, daß die Anlage aus räumlichen Gründen außerhalb des Laboratoriums als Freiluftanlage terassenförmig auf einem Dach aufgebaut ist.

Daher ist der Betrieb nur bei einigermaßen trockenem Wetter möglich. Die Spannung wird durch eine große Durchführung in das Innere des Laboratoriums geleitet, in dem sich auch die Gleichrichter- und Transformatorenanlage befindet, die zum Aufladen der Kondensatoren dient. Zwischen Gleichrichter- und Stoßanlage ist ein Umschalter angeordnet, der gestattet, der Anlage — je nach Bedarf — beide Polaritäten zu entnehmen. Dadurch ist es in bequemer Weise möglich, in dem Entladungsrohr Kanal- sowie Kathodenstrahlen zu erzeugen. Der Stoßgenerator ist einpolig fest geerdet. Die Messung der Ladespannung geschieht mittels eines Voltmeters, das in den Primärkreis des Ladetransformators eingeschaltet ist.

Ganz allgemein muß über die hier zu schildernde Entwicklung des Lamellenrohres und seines äußeren Aufbaues, die eine bessere und konstantere Arbeitsweise ergeben sollte, gesagt werden, daß die hierzu notwendigen Untersuchungen nicht systematisch hintereinander ausgeführt werden konnten. Die Tatsache, daß schon mit den ersten Lamellenröhren einige qualitative Versuche möglich waren, die einerseits die Anwendung schneller Elektronen für medizinische Zwecke in Aussicht stellten, andererseits die Möglichkeit erhoffen ließen, einige kernphysikalische Fragen zu klären, brachte es mit sich, daß man sich zunächst mit diesen relativ unvollkommenen Röhren begnügte. Im Verlauf solcher Untersuchungen kam es dann vor, daß sich das Entladungsrohr oft als unzulänglich erwies, und zwar erstens insofern, daß es der Beanspruchung eines Dauerbetriebes nicht gewachsen war; zweitens ergaben sich bei solchen Versuchen oftmals g a n z n e u e Anforderungen in Bezug auf irgendwelche speziellen Leistungsfähigkeiten. Aus solchen Gründen wurden dann von Fall zu Fall entsprechende konstruktive Veränderungen am Rohr vorgenommen, die also keiner systematischen Weiterbearbeitung des Entladungsrohrproblems entstammten. Diese Arbeitsweise war naturgemäß unter anderem auch darin begründet, daß die Versuche nur in Zusammenarbeit mit einem Fabrikbetrieb durchgeführt werden konnten, wodurch sich natürlich eine Betonung technischer Gesichtspunkte ergab, und auch die Zeiteinteilung dieser Arbeiten sich den regulären Betriebszeiten zum Teil unterordnen mußte. So standen für länger dauernde Versuche z. B. nur die Nachtzeiten zur Verfügung.

Bei dem von Brasch und Lange zuerst beschriebenen Aufbau war das Entladungsrohr zur Außenisolation in einem einfachen ölgefüllten Hartpapierzylinder untergebracht, von den ungefähren Dimensionen: Höhe 2 m, Durchmesser 60 cm. Hierbei wirkte aber die in der Achse des Hüllzylinders gelegene Spannungszuführung zum Rohr als Gegenelektrode für Gleitüberschläge über den ganzen Zylinder.

Auf Grund dieser Erfahrungen wurde die Apparatur in folgender Weise umgebaut; es wurde nicht mehr ein einzelnes zylindrisches Gefäß benutzt, sondern eine stufenförmige Anordnung gewählt, die eine glatte Oberfläche zwischen den Polen vermeidet, die Außengleitwege vergrößert und bei der man auch gleichzeitig mit einer verhältnismäßig geringen Oelmenge auskommt (Bild 2).

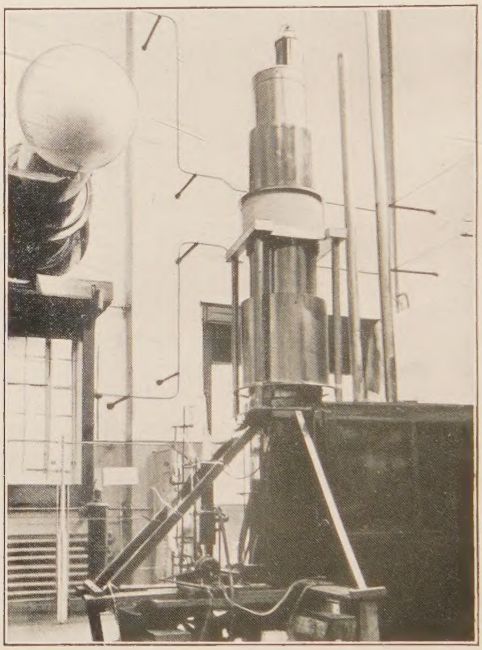


Bild 2.

Aelterer Rohraufbau.

Auf einem fahrbaren nachträglich versteiften Gestell befindet sich ein Aufbau von mehreren stufenweise angeordneten Hartpapierzylindern, in dem das Lamellenrohr untergebracht ist. Links daneben die Pumpapparatur, rechts eine behelfsmäßige Verdunkelungseinrichtung.

Aber auch dieser Aufbau zeigte noch keinen ausreichenden Erfolg; Gleitüberschläge traten doch noch gelegentlich auf und führten einige Male zu Durchschlägen der Hartpapierzylinder. Eine weitere Vergrößerung war bei dem Holzunterbau, der keine höhere Belastung zuließ, nicht mehr möglich. Außerdem ließ dieser Unterbau in seiner damaligen Form die Anbringung von umfangreicheren Hilfsapparaturen unmöglich zu, wie sie dann gerade im Verlauf von Untersuchungen über Kern-

probleme gebraucht wurden. Aus all diesen Gründen schien es wünschenswert, eine neue Gesamtapparatur aufzubauen, die alle diese Mängel nicht aufwies, und an der später alle weiteren Versuche ausgeführt wurden, die im folgenden geschildert werden.

Bild 3 und 4 zeigen diese neue Apparatur. Eine stabile Eisenkonstruktion von 2,30 m Höhe, 1,70 m Breite und 3,50 m Länge, deren oberer Abschluß aus einer 2 cm dicken, mit U-Schienen versteiften Eisenplatte besteht, trägt den eigentlichen Rohraufbau. Der durch diese Eisenkonstruktion gebildete Raum war somit groß genug, um die verschiedensten Hilfsapparaturen

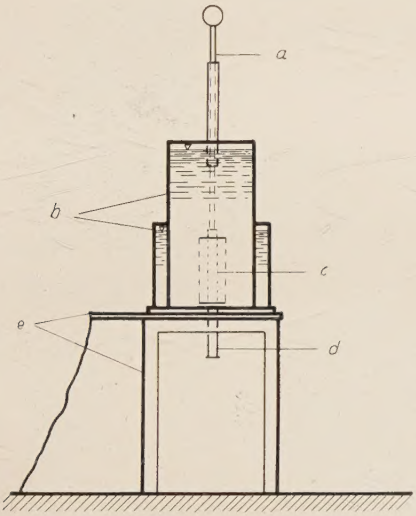


Bild 3.

Schematische Zeichnung vom neuen Rohraufbau.

a Spannungszuführung, b Hüllbehälter aus Hartpapier, c Entladungsrohr unter Öel, d Rohrstutzen mit Lenardfenster, e Eisenkonstruktion.

unterhalb des Entladungskanals ansetzen zu können. Er war außerdem mit einer Verdunkelungseinrichtung versehen, sodaß in bequemer Weise photographische Arbeiten wie auch Beobachtungen von Leuchterscheinungen (Scintillationen) durchgeführt werden konnten. Um den ganzen Raum, insbesondere die Umgebung des in den Beobachtungsraum hineinragenden geerdeten Endes des Entladungsrohres für solche Arbeiten zur Verfügung zu haben, ist die gesamte Pumpanordnung außerhalb untergebracht. Dies bedingte eine große Pumpleitungslänge von ca. 1,20 m, und um dabei keinen zu großen Strömungswiderstand

zu erhalten, wurde auch der Durchmesser sehr groß (18 cm) gehalten. Ein Mac Leod Manometer war direkt an der Pumpe angeschlossen, womit man gut vergleichende Druckmessungen ausführen konnte, aber nur annähernd die Absolutwerte der Drucke im Entladungsrohr selbst angeben konnte.

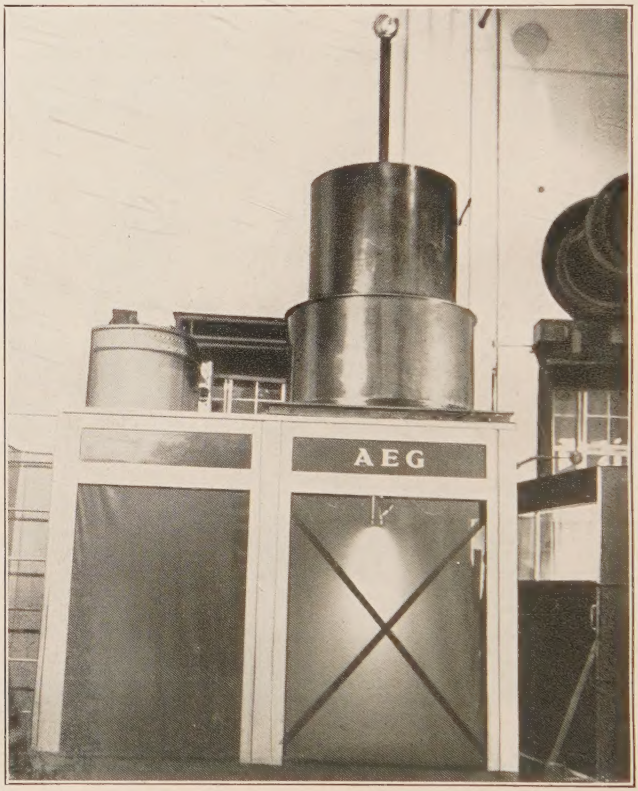


Bild 4.

Neue Lamellenrohrapparatur.

Ueber einer Eisenkonstruktion, die den verdunkelbaren Beobachtungsraum bildet, ist in einem großen ölgefüllten Isolierbehälter das Lamellenrohr untergebracht. Am unteren Ende des Isolierbehälters ist zur Verhinderung von Gleitungen noch ein zweiter Zylinder mit größerem Durchmesser angebracht. Das untere Ende des (nicht sichtbaren) Lamellenrohres ist durch einen Rohrstutzen bis in den Beobachtungsraum hinein verlängert. Hier bildet den Abschluß ein Lenardfenster, aus dem Kathodenstrahlen austreten und die Luft zum Leuchten anregen.

Auf diesem den Beobachtungsraum bildenden stabilen Eisengerüst befand sich der Oelbottich aus Hartpapier, in dem

das Lamellenrohr untergebracht war. Der Durchmesser des neuen Zylinders betrug ca. 1,15 m. Seine Höhe war so groß gewählt, wie es aus fabrikatorischen Gründen möglich war, sie betrug ungefähr 2,20 m. Durch den großen Durchmesser war der Einfluß der als Gegenelektrode für Gleitungen wirkenden achsialen Spannungszuführung zum Rohr soweit herabgesetzt, daß kaum noch Gleitüberschläge eintraten. Nur am unteren Ende der Anordnung (siehe Bild 3 Seite 9), an dem das gegenüber der Spannungszuführung wesentlich breitere Entladungsrohr den Abstand Gegenelektrode — Hüllbehälter verkleinerte, kam es gelegentlich zu Gleitungen. Diese Gleitungen ließen sich in der Folge leicht dadurch beseitigen, daß in diesem unteren Bereich ein zweiter Zylinder, der etwa ebenso hoch wie das Entladungsrohr war, angebracht wurde, sodaß auf der ganzen Länge der Abstand Gegenelektrode — Hüllbehälter einigermaßen der gleiche war. Durch diese Dimensionierungen war die Einsatzspannung für Gleitüberschläge genügend hoch geworden, sodaß die zur Verfügung stehende Hochspannung in dieser Hinsicht voll ausgenutzt werden konnte.

Als Material für die Metallringscheiben des Lamellenrohrs war von Brasch und Lange zunächst Aluminium gewählt worden, wofür wesentlich der niedrige Preis maßgeblich war. Wie aus Bild 1 zu ersehen ist, wurde der Innendurchmesser der Metallringscheiben kleiner als der der Isolierringscheiben gehalten, um die Isolierscheiben vor dem Aufprall von Ladungsträgern zu schützen. Es zeigten sich nach kurzem Betrieb verschiedenartige höchst unangenehme Zerstörungen der Aluminiumscheiben, und zwar aus folgenden Gründen: Einerseits gelangten unvermeidlicherweise Spuren von Quecksilberdämpfen in das Entladungsrohr, das ständig an einer Diffusionspumpe lag. Diese Dämpfe aktivierten in bekannter Weise das Aluminium. Ließ man nun Luft in die Apparatur, was beim Arbeiten oft nötig war, so führte die Luftfeuchtigkeit zur Bildung von Aluminiumhydroxyd, und zwar in so großen Mengen, daß sogar die Zwischenräume zwischen den Metallscheiben des Lamellenrohres überbrückt und somit die häufige Unterteilung zum Teil unwirksam wurde. Andererseits sah man, daß auch unter dem Einfluß der Entladung das Aluminium heftig verdampfte, eine Erscheinung, die in gewöhnlichen Gasentladungen in dieser Art nicht bekannt ist. Bei gewöhnlichen Gasentladungen treten Zerstäubungserscheinungen bekanntlich vorzugsweise an der Kathode, also durch Ionenaufprall auf, während es sich hier um eine ausgesprochene Korrosion durch Elektronenaufprall handelte. Diese Einwirkung schneller Elektronen auf Metalle und Isolatoren bei Stoßbetrieb ist von Brasch und Lange schon ausführlich behandelt worden. Da die hier erzeugten schnellen Elektronen schon eine merkliche Reichweite in Metallen haben,

ist der Sitz der Zerstörung — besonders wegen des „Tiefeneffekts", auf den später noch eingegangen wird — nicht ausschließlich unmittelbar auf der Oberfläche. Hieraus folgt, daß Materialien, die sich bei Ionenaufprall bewähren, nicht zwangsläufig geeignet sind zum Arbeiten mit solchen im Stoßbetrieb erzeugten schnellen Elektronen. Beispielsweise eignen sich Aluminium und Wolfram für Ionenbetrieb gut, versagen aber bei schnellen Elektronen, während Nickel in beiden Fällen gute Eigenschaften zeigt.

Um diese Schwierigkeiten zu vermeiden, hätte es nahe gelegen, Ringscheiben beispielsweise aus Nickel zu verwenden. Wegen des hohen Preises konnte jedoch dieses Material nicht benutzt werden, und es wurden beim darauffolgenden Rohraufbau stark vernickelte Kupferscheiben verwendet, was gegenüber Aluminium in Bezug auf die Quecksilbereinwirkung einen Fortschritt bedeutete. Es zeigte sich jedoch, daß die Vernickelung keinen ausreichenden Schutz darstellte, und die Elektronen durch die Nickelschicht hindurch am Kupfer starke Verdampfungen hervorriefen. Schließlich wurden dann Metallringscheiben aus V 2 A-Stahl verwendet, die auch diesen Uebelstand vermeiden und gleichzeitig den Vorzug haben, beim Reinigen gegen chemische Einflüsse beständig zu sein.

Bei dem ersten Lamellenrohr wurde von Brasch und Lange als Material für die Isolierscheiben Hartpapier gewählt. Obwohl natürlich von vornherein klar war, daß keramische Materialien für diesen Zweck unvergleichlich geeigneter gewesen wären, so wurden doch die in solchen Mengen in Entladungsröhren ungewöhnlichen Substanzen wie Hartpapier und Gummi angewendet. Dies geschah, weil anfangs nur hierdurch die charakteristische lamellenartige Wandunterteilung mit den zur Verfügung stehenden Mitteln möglich war und allerdings dann auch, weil bei so weitgehender Unterteilung und Riffelung der Wand an die Vakuumeigenschaften und Gleitfestigkeiten der Wandmaterialien im Vergleich zu den ausgeheizten und entgasten Wänden gewöhnlicher Röhren nur noch minimale Anforderungen gestellt werden brauchten. Wenn diese ersten Röhren auch in mancher Hinsicht schon befriedigten, indem sie das Arbeiten mit Spannungen von ca. 2 Millionen Volt in einer Stufe erstmalig erlaubten, so zeigten sie doch Mängel namentlich in der Hinsicht, daß sie sich beim Betrieb verschlechterten, indem sie bald nicht mehr die vollen Spannungen aushielten und auch überhaupt eine recht inkonstante Strahlung lieferten.

Will man aber die Sperrfähigkeit des Rohres steigern, was durch Verbesserung des Vakuums zu erreichen ist, so wird man in erster Linie daran denken, die Hartpapierscheiben durch keramische Materialien zu ersetzen, die mit einer sehr großen

Oberfläche den Vakuumraum begrenzen. Man wird dagegen die Gummidichtungen weiterverwenden, die nur mit einer verhältnismäßig kleinen Fläche an den Vakuumraum grenzen, wie das schematische Bild 1 zeigt.

Die Verwendung von Spiegelglasringscheiben bewährte sich nicht, da durch die Bohrung des mittleren großen Loches (ca. 10 cm) im Glas derartige Spannungen entstehen, daß solche Scheiben schon bei einer geringen Belastung, wie sie beim Uebereinanderschichten der Glas- und Metallringscheiben beim Rohraufbau entsteht, leicht Sprünge in radialer Richtung bekommen. Erst wenn solche Glasringscheiben nach dem Sekuritverfahren[4]) behandelt werden, erhalten sie eine genügende Bruchfestigkeit, um für den Rohraufbau verwendet werden zu können. Solche Scheiben konnten dann probeweise mit einem Druck von über hundert Tonnen aufeinandergepreßt werden, ohne jemals dabei zu zerspringen. Ein Rohraufbau aus solchen Sekuritglasscheiben wurde dann ausgeführt, und zeigte die erwähnten Mängel in wesentlich geringerem Maße, obwohl die Lamellenunterteilung des Rohres wegen der unvermeidlichen größeren Dicke der Glasringscheiben (6 mm gegenüber 1 mm bei Hartpapierscheiben) eine wesentlich geringere Unterteilungszahl zuließ. Dieses Rohr zeigte gegenüber dem Hartpapierrohr den Nachteil, daß wegen der geringeren Durchschlagsfestigkeit von Glas besonders unter Oel seine Länge von 84 cm auf etwa 1,05 m vergrößert werden mußte.

Schließlich wurden die Isolierlamellen aus Mycalex (Mischung aus Glimmer und Bleiborat) hergestellt, das neben der großen Bruchfestigkeit, die vor allem durch eine gewisse Plastizität des Materials bedingt ist, besonders eine sehr hohe Durchschlagsfestigkeit hat, sodaß bei einem solchen Rohr selbst gegenüber dem Hartpapierrohr eine Verkleinerung der Dimensionen möglich wird.

Die Abdichtung des Vakuums erfolgte durch zwischen je zwei Lamellen liegende Gummiringe, die bei dem ersten Modell im Wesentlichen beim Evakuieren durch den atmosphärischen Luftdruck aufeinander gedrückt waren. Um dem Aufbau auch im unevakuierten Zustand eine gewisse Festigkeit zu verleihen, war das senkrecht stehende Rohr außerdem durch ein Gewicht beschwert. Die Gummiringe waren dabei zunächst aus Billigkeitsgründen nach einem Verfahren hergestellt, das in Bezug auf die Gleichmäßigkeit der Dicke sehr viel zu wünschen übrig ließ. Deshalb war ihre abdichtende Wirkung — besonders bei der primitiven Form der Pressung des Rohres — nicht sehr zuverlässig. Hierdurch drang einige Male äußeres Isolieröl in den Vakuumraum ein und schädigte oder zerstörte das Rohr. Dieser

[4]) Naturwissenschaften 48, 855 (1933).

Mangel wurde folgendermaßen behoben. Erstens durch Verwendung einer besonderen Preßanordnung, die dauernd auf das Rohr wirkte; zweitens durch Verwendung von Gummiringen, die nach einem besseren Verfahren mit gleichmäßiger Dicke hergestellt waren; drittens durch den Schutz des Gummis vor der Berührung mit dem Isolieröl durch eine dünne Bakelitschicht, die nach dem Aufbau aufgetragen wurde. Es wurde zwar von Anfang an mit sogenanntem ölfesten Gummi gearbeitet, jedoch ist jeder aus natürlichem Kautschuk hergestellte Gummi niemals ganz ölfest, und zeigt bei längerer Benetzung mit Oel Quellungen, die leicht Undichtigkeiten bewirken. Erst der in letzter Zeit hergestellte synthetische Kautschuk ist wirklich so ölfest, daß bei ihm Schutzmaßnahmen gegenüber der äußeren Oelbenetzung des Rohres überflüssig werden.

Beim Stoßbetrieb ist wegen der kurzen Dauer der Stöße von ca. 10^{-5} sec, die im allgemeinen eingehalten wurde, die Verwendung großer Emissionsströme nötig, um die in der kurzen Zeit zur Verfügung stehenden großen Energien auch wirklich im Rohr nutzbar machen zu können. Wie schon erwähnt, beträgt die Zeit, in der der Stoßgenerator ohne Rohr auf seine halbe Spannung absinkt, 200 Mikrosekunden. Soll also die Energie des Stoßgenerators nicht in seinen Ladewiderständen frei werden, sondern möglichst im Entladungsrohr, so muß die Stromstärke im Entladungsrohr groß gewählt werden im Vergleich zu der Stromstärke in den Ladewiderständen. Also muß die Halbwertszeit des Stoßgenerators mit angeschaltetem Entladungsrohr klein sein im Vergleich zur Halbwertszeit der Anlage allein. Andererseits ist zu bedenken, daß die Spannung bei einem Stoßgenerator nicht momentan auftritt, sondern sich erst in einer gewissen Zeit, hier in etwa 0,5 Mikrosekunden, aufbaut. Der Widerstand des Rohres muß natürlich so bemessen sein, daß die Halbwertszeit mit Rohr groß ist gegenüber der Aufbauzeit der Spannung. Aus diesen Gründen war man bestrebt, die schon erwähnte Halbwertszeit von ca. 10 Mikrosekunden einzuhalten. Hierzu sind, wie schon angedeutet, sehr beträchtliche Stromstärken im Entladungsrohr notwendig und zwar von der Größenordnung einiger Tausend Ampere. So hohe Ströme lassen sich tatsächlich verhältnismäßig leicht mittels einer Gasentladung oder auch mit besonderen Emissionsquellen als Elektronenströme erzeugen. Ionenströme dieser Stärke konnten dagegen nicht annähernd erhalten werden. Daher eignet sich die Stoßmethode ganz besonders zur Erzeugung schneller Kathodenstrahlen. Daß tatsächlich Kathodenstrahlen von einigen Tausend Ampere Stromstärke erzeugt werden konnten, geht schon aus Messungen Goldmanns[5]) hervor, der nachweisen konnte, daß bis zu 25 % der auf den Kondensatoren des Stoß-

[5]) Brasch, Naturwissenschaften Heft 5/6/7, 84 (1933).

generators befindlichen Energie im Kathodenstrahl kalorimetrisch wieder nachweisbar ist. Der Nutzeffekt des Rohres allein war sicherlich aber noch größer, da am Stoßgenerator und an den Zuleitungen sicher auch beträchtliche Energieverluste auftraten.

Versuche und Messungen an Kathodenstrahlen.

Die Methode der Kalorimetrierung der Kathodenstrahlung wurde unter anderem auch hier für vergleichende Intensitätsmessungen benutzt. Die Strahlung trat dabei im allgemeinen aus einem Lenardfenster mit einem Trägergitter aus Nickel von ca. 10 cm Durchmesser durch eine Aluminiumfolie von 0,05 mm Stärke in die Atmosphäre und fiel auf eine Metallplatte, in der sie ganz absorbiert wurde. Mit dieser Metallplatte in gutem thermischen Kontakt befand sich ein Beckmann-Thermometer, an dem bei Berücksichtigung des zeitlichen Temperaturganges durch Wärmeausgleich die Wärmewirkung der Elektronen ermittelt wurde.

Wenn auch diese Methode in Bezug auf Genauigkeit allen Ansprüchen genügte, so ist sie doch besonders wegen der bei jeder Messung erforderlichen Gangbeobachtung recht zeitraubend. Da nun das Bedürfnis bestand, die Intensität der Kathodenstrahlen jeweils möglichst schnell zu messen, um sowohl für die medizinischen Anwendungen Dosismessungen ausführen zu können, als auch das Entladungsrohr in Bezug auf irgendwelche auftretenden Störungen zu kontrollieren, so bestand doch die Notwendigkeit, sich nach bequemeren Verfahren umzusehen

Als nächste Methode wurde die Bildung von H_2O_2 aus H_2O benutzt. Die Menge des H_2O_2, die bei einem Impuls bei normalem Betrieb gebildet wird, beträgt ca. $7{,}5 \cdot 10^{-5}$ g. Das ist eine Menge, die titrimetrisch noch gemessen werden kann, und zwar wurde gearbeitet mit der Entfärbungsreaktion von Kaliumpermanganat, später mit der Jodabspaltung aus Jodkalium, das mit Stärke nachgewiesen und mit Thiosulfat titriert wurde. Die letztere Reaktion ist zwar außerordentlich empfindlich, jedoch nicht sehr zuverlässig, da geringe Jodmengen auch von allein im Lauf der Zeit sich ausscheiden, die in Abzug zu bringen von der durch die Bestrahlung entstandenen Jodmenge umständlich und nicht zuverlässig ist. Als beste chemische Methode bewährte sich noch die Titansäurereaktion, und zwar in Verbindung mit dem photoelektrischen Kolorimeter nach Bruno Lange[6]). Hiermit läßt sich die Intensität eines Impulses mit der Genauigkeit

[6]) Bruno Lange, Chemische Fabrik 5, 457 (1932). Die Photoelemente und ihre Anwendung. 2. Teil. J. A. Barth, Leipzig, 1936.

von 2—3 % messen, und die Messung erfolgt auch in denkbar einfachster Weise, indem die bestrahlte Titansäurelösung in das Kolorimeter gebracht und an einem Zeigerausschlag die Kathodenstrahlintensität sofort abgelesen wurde. Obwohl diese Methode in Bezug auf Bequemlichkeit und Genauigkeit ziemlich weitgehenden Ansprüchen genügt, wurde doch noch versucht, mit einer physikalischen Methode weiterzukommen, um auch noch Intensitäten, die nur einen kleinen Bruchteil der Intensität e i n e s Impulses haben, genau messen zu können, und auch bei der medizinischen Anwendung den Arzt nicht mit der Ausführung irgendwelcher chemischer Reaktionen zu belasten.

Als physikalische Methoden kommen naturgemäß in Betracht entweder die ionisierende Wirkung der Kathodenstrahlen oder ihre Fähigkeit, einen Leiter aufzuladen. Die ionisierende Wirkung der Kathodenstrahlen ist nun selbst bei kontinuierlichem Betrieb, also bei einer Stromstärke eines Milliampere, bereits so groß, daß es ohne weiteres nicht möglich ist, Sättigung zu erhalten. Bringt man an die Elektroden einer Ionisationskammer eine Spannung, so wächst der Ionisationsstrom bei den geschilderten Bedingungen mit steigender Spannung beliebig an und geht schließlich stetig in einen Lichtbogen über. Wenn es auch möglich sein wird, nur einen sehr kleinen Bruchteil der zu messenden Kathodenstrahlintensität auszusondern und in die Ionisationskammer zu geben, so würde doch hier die Anwendung der Ionisationsmethode ganz besonders schwierig sein, weil bei der Verwendung der Stoßmethode im Stoßmoment Intensitäten zu messen sind, die um den Faktor 10^5 größer sind als beim kontinuierlichen Betrieb. Aus diesen Gründen wurde die Ionisationsmethode hier zunächst nicht benutzt.

Es wurde dann die Frage untersucht, ob Photozellen auf Kathodenstrahlen in brauchbarer Weise ansprechen. Es zeigte sich, daß sowohl Sperrschicht- wie auch Widerstandsselenzellen Ströme liefern, aber nur die Sperrschichtzelle praktisch in Betracht kam, die selbst in unserem Intensitätsbereich noch linear arbeitet, während bekanntlich die Selenwiderstandszelle einen quadratischen Effekt gibt. Das hat zur Folge, daß bei einer Messung die Dauer des Stoßes bekannt sein muß, während dies bei der linearen Sperrschichtzelle nicht der Fall zu sein braucht. Die ballistisch zu messenden Elektrizitätsmengen sind allerdings recht klein, sodaß normale ballistische Spiegelgalvanometer kaum ausreichend sind, und es erwies sich als vorteilhaft, mit dem Mirravi-Instrument von Hartmann und Braun zu arbeiten. Dieses Instrument hat zwar bei Dauerausschlag nur eine Empfindlichkeit von 10^{-8} mm m, hat aber eine sehr kurze Schwingungsdauer, wodurch die ballistische Empfindlichkeit entsprechend groß wird, die Empfindlichkeit gegen Störungen aber recht klein ist.

Wie schon erwähnt, ist es naheliegend, die negative Aufladung einer Metallplatte bei auffallenden Kathodenstrahlen zu benutzen. Bestrahlt man tatsächlich eine Metallplatte von ausreichender Dicke, um die Strahlen vollkommen zu absorbieren, mit schnellen Elektronen, so zeigt sich im allgemeinen eine positive Aufladung, die davon herrührt, daß wenig schnelle Elektronen viele langsame Sekundärelektronen auslösen. Außerdem ist die Höhe der erzielten positiven Aufladung aber vollkommen schwankend, abhängig von den Oberflächeneigenschaften des Materials, wobei gelegentlich sogar negative Werte vorkommen.

Lenard[7]) hatte gefunden, daß es möglich ist, reproduzierbare Verhältnisse bei solchen Aufladungen zu erhalten, indem man den zu bestrahlenden Leiter nicht direkt der Kathodenstrahlung aussetzt, sondern ihn, wie Bild 5 zeigt, durch einen einseitig geerdeten Isolator hindurch bestrahlt, und zwar von solcher Dicke, daß dabei die weichere Sekundärstrahlung zurückgehalten wird.

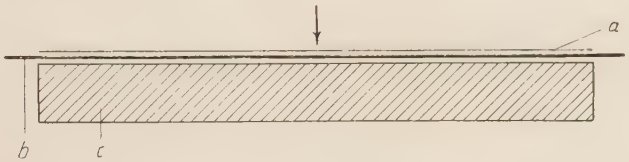


Bild 5.

Aufladem ethode.

a geerdete Metallfolie, b Isolator, c Metallplatte.
Der Pfeil deutet die Einfallsrichtung der Strahlung an.

Es wurde nun untersucht, ob dieses Verfahren in dem hier interessierenden Spannungsbereich bei den großen momentanen Intensitäten der Stoßmethode verwendbar bleibt, und außerdem die ungefähre Reichweite der Sekundärelektronen untersucht. Hierzu fiel die Kathodenstrahlung hintereinander durch eine Anzahl Schichten photographischen Kunstlichtpapiers, zwischen denen sich Absorbermaterial (Preßspan, Wasseräquivalent etwa 1) von je 0,4 mm Dicke befand, und traf dann auf einen Streukörper aus Blei, der von einer Seite bis in die Mitte des Strahlungsfeldes hereinragte (Bild 6). Das photographische Papier zeigt eine besonders intensive Schwärzung auf der Seite, wo es außer von der direkten Strahlung auch noch von der vom Blei ausgehenden Sekundärstrahlung getroffen wird. Mit zunehmender Absorberdicke gegenüber dem Streukörper nimmt die Schwärzung rasch ab und fällt bald auf einen Wert, der kein

[7]) Lenard, Wied. Annalen, 64, 288 (1898), und Becker, Ann. d. Ph. 13, 394, 1904.

Hervortreten der Grenze am Ende des Streukörpers mehr erkennen läßt. Die Reichweite der Sekundärstrahlung kann man aus solchen Versuchen zu 1 bis 1,2 mm Wasseräquivalenz bei einer Streurichtung entgegengesetzt zum primären Strahl abschätzen. Aehnliche Versuche wurden auch für die Vorwärtsstreuung gemacht, worauf nicht näher eingegangen werden soll.

Bei der Auflademéthode zur Intensitätsmessung wurde als Isolator dünnes Hartpapier benutzt, das auf seiner der Strahlung zugekehrten Seite mit einer 0,01 mm dicken geerdeten Aluminiumfolie bedeckt war. Es war möglich, seine Dicke verhältnismäßig gering zu halten, bei der ersten praktischen Ausführung betrug sie 0,6 mm Wasseräquivalenz. Wahrscheinlich ist es möglich, die Dicke des Schutzisolators weiter wesentlich zu verkleinern, da wohl nur die langsamsten Komponenten der Sekundärstrahlung bei ungeschützter Aufladeplatte die Unreproduzierbarkeit verursachen. Die Auflademéthode erwies sich von den angeführten Methoden zur Intensitätsmessung als

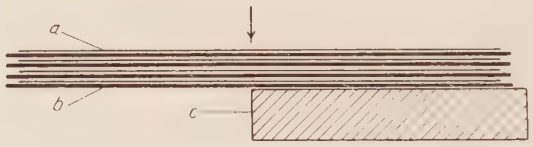


Bild 6.

Bestimmung der Reichweite der Sekundärelektronen.

a Photographisches Papier, b Absorber, c Streukörper. Der Pfeil deutet die Einfallsrichtung der Strahlung an.

die weitaus bequemste und war geeignet, noch Intensitäten von der Größenordnung eines Tausendstel eines Impulses genau genug zu messen.

Für den Fall, daß die Gesamtintensität eines Impulses gemessen werden sollte, ohne aber die Verwendung der Kathodenstrahlung für einen anderen Zweck auszuschließen, wie es bei der chemischen und kalorimetrischen Methode der Fall ist, zeigte es sich als möglich, die Intensität der von den Elektronen ausgelösten Röntgenstrahlen in einer Ionisationskammer zu messen. Durch Schwächung der Röntgenstrahlen, z. B. durch Wahl eines großen Abstandes von der Antikathode zur Ionisationskammer (ca. 15 m), war es möglich, die Intensität soweit herabzusetzen, daß Sättigung in der Kammer erreicht wurde. Um solche Messungen schnell hintereinander ausführen zu können, war die Ionisationskammer, die besonders gut elektrostatisch geschützt sein mußte, um durch Störungen vom Stoßgenerator nicht beeinflußt zu werden, mit einem elektrischen Relais verbunden (Bild 7). Dies ermöglichte es, von Hand oder

automatisch das vollkommen gekapselte Elektroskop aufzuladen und somit sehr schnell meßbereit zu machen.

Bei diesen Intensitätsmessungen zeigte sich, daß die gewöhnlichen Röhren mit Hartpapierlamellen und einer Gasentladung als Kathodenstrahlquelle eine außerordentlich inkonstante Strahlung lieferten. Es kamen Schwankungen um eine Zehnerpotenz bei zwei aufeinanderfolgenden Impulsen vor. Die besten Erfolge in Bezug auf Konstanz wurden mit den erwähnten Röhren mit keramischen Lamellen erzielt, wenn sie so hoch evakuiert waren, daß keine Gasentladung mehr einsetzte und eine besondere Kathode die Elektronen lieferte. Die Schwan-

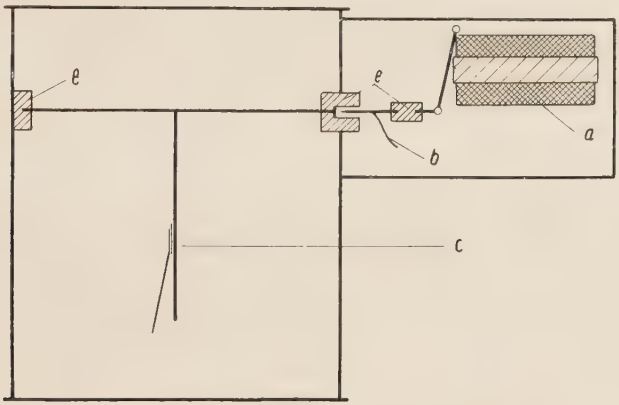


Bild 7.

Schema der Ionisationskammer zur Bestimmung der Gesamtintensität der Kathodenstrahlen auf dem Umweg über die Messung der Röntgenstrahlenintensität.

a Relais, b Zuführung für die Aufladespannung, c Goldblattsystem, e Isolatoren.

kungen der Gesamtintensität betrugen dann (gemessen über die Röntgenstrahlung) etwa 2—3 %. Dagegen waren die Schwankungen der Strahlung bei Ausblendung einer sehr geringen Intensität — gemessen mit der Aufladem ethode — auch bei keramischen Röhren 100—200 %. D. h. also, daß die Kathodenstrahlen an einem mehr oder weniger scharfen Brennfleck auf die Antikathode auftreffen, der bei den einzelnen Stößen hin und herschwankt. Dabei ändert sich dann nur wenig die Gesamtintensität, sehr stark dagegen d i e Intensität der Kathodenstrahlen, die aus einer feinen Lochblende austritt, je nachdem, ob der Brennfleck gerade auf das Blendenloch fällt oder nicht.

Wie schon erwähnt, war bei diesen letzteren Versuchen eine besondere Kathode die Quelle der Elektronen. Zwecks Er-

zielung großer Momentanströme muß eine solche Kathode natürlich sehr leistungsfähig sein und selbst, wenn man eine Wehnelt-Kathode verwenden würde, müßte sie bei einigen Tausend Ampere Emission recht unbequem große Dimensionen haben, abgesehen davon, daß in einem solchen Rohr auch in der keramischen Ausführung beträchtliche Mengen organischer Dämpfe vorhanden sind, die die Funktionen der Emissionseinrichtung stören. Es wurde daher die von Brasch und Lange beschriebene Gleitkathode verwandt, die schon bei recht kleinen Dimensionen die verlangten Emissionsströme hergibt. Bekanntlich sind ja die bei normalen Röhren bei einer Spannungsüberbeanspruchung einsetzenden Gleitentladungen die Ursache, wodurch selbst bei einer so ungeheuer leistungsfähigen Spannungsquelle, wie sie der Stoßgenerator darstellt, ein Zusammenbruch der Spannung bewirkt wird. Wenn man also in der Lage ist, den Spannungszusammenbruch durch geeignete Maßnahmen überhaupt zu unterdrücken, so wird es also auch leicht möglich sein, ihn nur auf ein solches Maß herunterzudrücken, daß der Elektrizitätstransport gerade in gewünschten Dimensionen verläuft. Als geeignete Form einer solchen Kathode erwies sich die Anwendung von verschieden großen Glaswolle-Bäuschen. Solche Kathoden arbeiten, wie schon erwähnt, recht gleichmäßig, haben aber bisher noch die Eigenschaft, im Laufe der Zeit wohl durch eine Entgasung allmählich geringere Intensitäten zu liefern, und müssen nach längerem Betrieb wieder an Luft gebracht werden.

Da zur Spannungsmessung für die 2,4 Millionen Volt-Anlage keine ausreichende Meßfunkenstrecke zur Verfügung stand, und eine Spannungsunterteilung bei der Stoßmethode wegen der Zusammensetzung der Sprungwelle aus sehr verschiedenen Frequenzanteilen auch keine quantitativen Ergebnisse liefert, wurde eine magnetische Ablenkung der im Rohr beschleunigten Elektronen durch ein homogenes transversales Magnetfeld benutzt, um deren Geschwindigkeit zu messen. Eine solche Apparatur, die in Bild 8 dargestellt und näher erläutert ist, liefert für jede Geschwindigkeit auf einer photographischen Platte eine entsprechende Kreisbahn. Die Ermittlung des Spannungsverlaufs am Rohr durch Oszillographieren mittels Kathodenstrahloszillographen — die Aufnahmen führte Herr Dr. Frühauf aus — zeigte, daß abgesehen von einigen überlagerten Schwingungen die Spannung, wie schon erwähnt, in etwa 0,5 Mikrosekunden ansteigt und dann einigermaßen gleichmäßig verschieden schnell — je nach den Betriebsbedingungen — auf Null abfällt. Man sollte dementsprechend erwarten, daß die von dieser zeitlich veränderlichen Spannung erzeugten Kathodenstrahlen ein kontinuierliches Geschwindigkeitsspektrum haben. Demgegenüber zeigen die Ablenkungsaufnahmen einen ausgesprochen diskon-

tinuierlichen Charakter (Bild 9 a—f). Mit dieser Apparatur wurde die Strahlung der ersten Hartpapierlamellenröhren untersucht, und man sah dabei, daß die härtesten Komponenten der Kathodenstrahlen immer merklich weicher waren als der maximal angelegten Spannung entsprach, die allerdings ihrerseits nur mit einer Genauigkeit von etwa 10 % geschätzt werden konnte (Bild 9 a und b). Außerdem zeigte sich, daß das

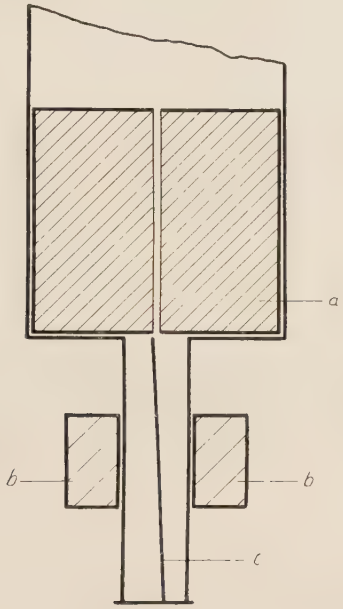


Bild 8

Magnetische Ablenkungsapparatur im Vakuum.

Die Kathodenstrahlen werden durch eine 10 cm dicke (zur Absorption der störenden Röntgenstrahlen) und 0,3 mm breite Blende a ausgeblendet, und es treffen somit nur parallele Strahlen auf eine schwach geneigte Photoplatte c, die zwischen den beiden Polen b eines Magneten angeordnet ist. Durch dieses Transversalfeld werden die Elektronen in bekannter Weise zu Kreisbahnen abgelenkt, deren Ebene senkrecht zur Papierebene liegt.

Verhältnis der Intensitäten der weichen zur harten Strahlung, je nach dem augenblicklichen Zustand des Entladungsrohrs, stark schwankte (Bild 9 c). Weitere Versuche mit einem keramischen Rohr, die bisher allerdings nur mit niedrigeren Spannungen (bis zu einer Million Volt) ausgeführt worden sind, zeigten eine konstante Härtezusammensetzung der Strahlung, wobei auch die härteste Komponente nahezu mit der maximalen Spannung zusammenfiel, die in diesem Bereich mit der Kugelfunkenstrecke gemessen wurde. Auch diese Geschwindigkeits-

spektren wiesen dabei eine regelmäßigere Struktur auf (Bild 9 d und e). Es wurde dann untersucht, ob diese Struktur nicht doch durch irgend welche Schwingungserscheinungen im Stoßgenerator hervorgerufen wurden, die vielleicht in den Kathoden-

a b c

Bild 9 a, b, c.

Magnetische Ablenkungsaufnahmen schneller Elektronen (Hartpapierlamellenrohr).

Die Aufnahmen sind mit nur einem Impuls des Stroßgenerators aufgenommen und zeigen unerwarteter Weise eine diskontinuierliche Geschwindigkeitsverteilung der Elektronen. Die Geschwindigkeit der schnellsten Elektronen ist in allen Fällen geringer als der Maximalspannung am Entladungsrohr entspricht.

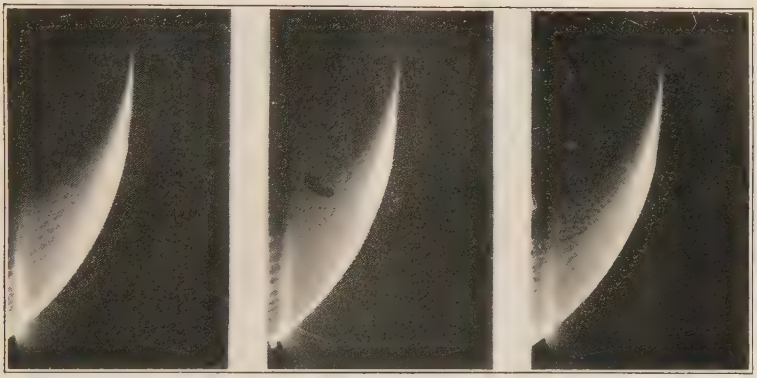
a Maximalspannung errechnet 1,75 Millionen Volt.
Schnellste Elektronen nach Aufnahme 1,15 Millionen Volt.
Feldstärke 875 Ørsted.

b Maximalspannung errechnet 2,2 Millionen Volt.
Schnellste Elektronen nach Aufnahme 1,66 Millionen Volt.
Feldstärke 1124 Ørsted.
Bei a und b ist die Lage der Magnetpole durch einen entsprechenden Kreis gekennzeichnet.

c Diese Aufnahme wurde an einem Rohr erhalten, in das etwas äußeres Isolieröl eingedrungen war. Man sieht, daß die härteste Komponente bei weitem nicht die intensivste ist.

strahloszillogrammen nicht enthalten waren, weil im Spannungsteiler diese sehr hochfrequenten Komponenten verloren gegangen sein konnten. Deshalb wurde zwischen Rohr und Stoß-

generator ein induktionsfreier Widerstand (Flüssigkeitswiderstand) von solcher Höhe eingeschaltet, daß die Betriebsspannung am Rohr bei gleichbleibendem Betrieb des Stoßgenerators merklich abfiel. Die Spannungsamplituden der eventuellen hochfrequenten Ueberlagerungen hätten also hierdurch praktisch



d e f

Bild 9 d, e, f.

Diese Aufnahmen zeigen den Charakter der Kathodenstrahlung eines keramischen Lamellenrohres.

Man erkennt eine nahezu regelmäßige Struktur, der außerdem eine Feinstruktur überlagert ist. Die härteste Komponente der Elektronen entspricht in diesem Rohr fast der maximalen Betriebsspannung, die mit einer Kugelfunkenstrecke gemessen wurde.
Im Druck kommen die Feinheiten der Struktur nicht ganz zur Geltung.

d Maximalspannung gemessen 920 Kilovolt.
Härteste Komponente nach Aufnahme 880 Kilovolt.
Feldstärke 180 Ørsted.

e Dieselben Daten wie Aufnahme d.

Da vermutet wurde, daß sehr hochfrequente Schwingungen im Stoßgenerator die Struktur hervorrufen könnten, wurde zwischen Rohr und Anlage ein Flüssigkeitswiderstand eingeschaltet, der mit Sicherheit alle eventuellen Schwingungen unterdrückt hätte.

f Eine solche Aufnahme mit Flüssigkeitswiderstand zeigt genau denselben Charakter wie die Aufnahmen d und e, nur die Spannung am Rohr ist etwas abgesunken.

Maximalspannung gemessen 885 Kilovolt.
Schnellste Elektronen aus Aufnahme 835 Kilovolt.
Feldstärke 180 Ørsted.

zum Verschwinden gebracht werden müssen. Die entsprechenden Aufnahmen zeigen jedoch wieder eine ähnliche Struktur (Bild 9 f). Damit erscheint deren Charakter recht rätselhaft, und es liegt ihr möglicherweise eine neuartige physikalische Erscheinung zu Grunde.

Bei den ersten Versuchen, bei denen schnelle Elektronen auf Metall trafen, zeigten sich, wie Brasch und Lange schon mitgeteilt haben, Verdampfungen, die mit einer eigentümlichen Blasenbildung verbunden waren. Das Auftreten dieser und ähnlicher Erscheinungen an Isolatoren wurde in der erwähnten Veröffentlichung[8]) dahin gedeutet, daß die Energie der auftretenden Strahlung in einer gewissen Schicht unter der Oberfläche in wesentlich höherem Maße abgegeben wurde, als auf der Oberfläche selbst. Wenn auch diese Deutung recht wahrscheinlich schien, so war doch zunächst der Einwand möglich, daß die bestrahlten Metalle vorzugsweise vielleicht in der hier interessierenden Tiefenschicht Gase occludiert hätten, die bei einer plötzlichen lokalen Erhitzung zu der geschilderten Strukturänderung führten. Es bestand deshalb die Notwendigkeit, durch neue Versuche diesen Einwand auszuschließen. Dies war in folgender Weise möglich.

Es wurden Stücke ein und derselben Zinnfolie mit einem gewissen Luftabstand von etwa 1 mm hintereinander aufgespannt. Nach längerem Probieren gelang es dann, daß bei günstigen Intensitätsverhältnissen einige der Strahlung zugekehrte Folien nahezu unverändert blieben, während die darauffolgenden zerstört wurden. In ähnlicher Weise ließ sich dann ebenfalls nach anfänglichen Mißerfolgen der Tiefeneffekt verifizieren bei der Bestrahlung von übereinander geschichteten Lagen von Eisensalzpapieren. Die quantitativen Absorptionsverhältnisse konnten dann am bequemsten an einem biologischen Testobjekt, und zwar an Fliegeneiern (Drosophila melanogaster) untersucht werden. Die Versuche, die gemeinschaftlich mit den Herren Glocker, Kugler und Langendorff[9]) ausgeführt wurden, ergaben zunächst keine eindeutigen Ergebnisse, besonders, da das hierbei benutzte Entladungsrohr wegen eines Oeldurchbruchs beschädigt war und eine für solche Messungen wenig brauchbare Härtezusammensetzung der Strahlung lieferte. Späterhin ergaben sich mit einem neuen Rohraufbau und besonders bei Verwendung einer Strahlung, die magnetisch monochromatisiert war, Absorptionskurven, die ein sehr steiles Maximum der Energieabgabe in einer gewissen Tiefe zeigten, das in seiner Größe und Tiefenlage vom Atomgewicht der Absorbersubstanz abhängig war. (Bild 10.)

Zur Frage des Zustandekommens des Tiefeneffekts haben Brasch und Lange[10]) zunächst an die bekannte Erscheinung gedacht, daß schnelle Elektronen an von ihnen durchsetztes Material weniger Energie abgeben als langsame, und daß dieser Erscheinung sich dann Diffusionsvorgänge überlagern, die be-

[8]) Brasch, Strahlentherapie, 44, 505 (1932).
[9]) Glocker, Kugler, Langendorff, Strahlentherapie 51, 129 (1934).
[10]) Brasch und Lange, Strahlentherapie, 51, 119 (1934).

wirken, daß erstens das Maximum nicht so hoch wird, wie man es auf Grund der Abhängigkeit der Energieabgabe von der Geschwindigkeit erwarten sollte (etwa 1 : 100) und daß es zweitens in seiner Lage mehr an die Oberfläche verschoben wird.

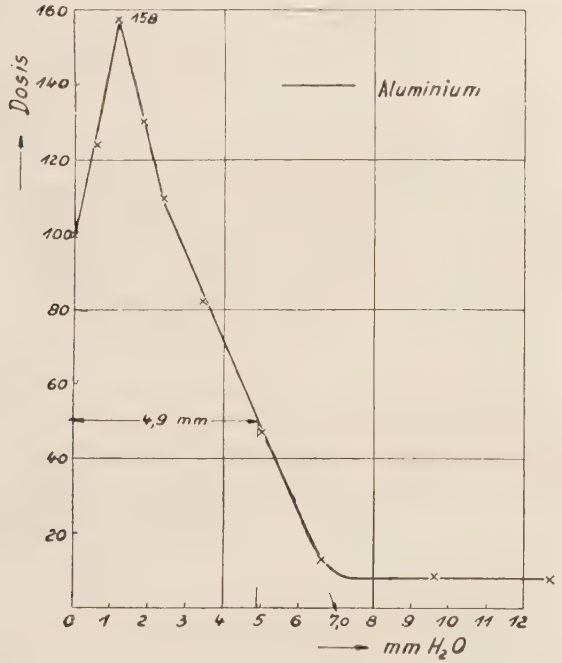


Bild 10.

Tiefenabsorptionskurve schneller Kathodenstrahlen in Aluminium.

Hinter verschieden dicken Aluminiumschichten wurde die abtötende Wirkung der Kathodenstrahlen an den Eiern der Drosophila-Fliege beobachtet. Man sieht aus dieser Kurve ein Maximum der Absorption hinter Aluminium von 2 mm Wasseräquivalenz bei Kathodenstrahlen der Beschleunigungsspannung 1,6 Millionen Volt. Danach nimmt die Intensität der absorbierten Strahlung stark ab — auf 50 % der Oberflächendosis bei 4,9 mm Wasseräquivalenz — und erreicht eine Endreichweite von etwas über 7 mm. Der letzte Teil der Kurve, der parallel zur Achse verläuft, stellt eine überlagerte Röntgenstrahlung dar.

(Aus: Glocker, Kugler, Langendorff, a.a.O.)

R. Glocker machte dann darauf aufmerksam, daß das Steckenbleiben der Elektronen im Material eine solche Intensitätsabnahme mit zunehmender Eindringtiefe bewirkt, daß dadurch die Wirkung der verschiedenen Geschwindigkeiten weitgehend verdeckt wird, und man demnach nach anderen Erklärungen Ausschau halten sollte. Er versuchte eine Deutung des Tiefeneffekts auf Grund der Vorstellung, daß die ursprünglich

parallele Strahlung beim Eindringen in den Absorber mehr und mehr diffus wird.

Man könnte natürlich bei einer Erklärung auch an einen ähnlichen Vorgang denken, der vielfach bei der Höhenstrahlung zur Erklärung eines Tiefeneffekts herangezogen worden ist, und der dann dort so gedeutet worden ist, daß im durchsetzten Material eine vorzugsweise nach vorn gerichtete Sekundärstrahlung ausgelöst wird, die sich der Wirkung der Höhenstrahlung überlagert, und deren Reichweite dem Abstand des Maximums von der Oberfläche entspricht. Wie schon erwähnt, konnte hier tatsächlich nachgewiesen werden, daß auch vom Material, auf das sehr schnelle Kathodenstrahlen treffen, eine sekundäre Kathodenstrahlung ausgeht, deren Intensität zur Hervorrufung des Tiefeneffekts tatsächlich mehr als ausreichend ist. Die Richtungsverteilung der Sekundärstrahlung scheint ein Maximum nach vorwärts zu haben in Bezug auf die primäre Strahlung, und die erwähnte Abschätzung der Reichweite ergibt auch einen Wert, der dem Abstand des Maximums von der Oberfläche ungefähr entspricht.

Nach Entdeckung der Positronen und nachdem man wußte, daß zur Zwillingsbildung mindestens eine Gammastrahlung von einer Million Volt nötig ist, war es naheliegend, an der hier benutzten Apparatur, die bisher als einzige erlaubt, Elektronen und Röntgenstrahlen im Bereich von 2 Millionen Volt von sehr großer Intensität herzustellen, Versuche in dieser Richtung zu unternehmen. Hierzu wurden schnelle Elektronen auf Folien verschiedenen Materials geschossen und die vorwärts und rückwärts auftretende Sekundärstrahlung mit dem erwähnten magnetischen Geschwindigkeitsanalysator untersucht. Hierbei konnten niemals mit Sicherheit Positronen nachgewiesen werden, die auf den Aufnahmen Kreisbahnen von entgegengesetzter Krümmung wie die Elektronen hätten geben müssen.

Als einzig Interessantes bei diesen Versuchen ergab sich nur, daß auch in einigen Fällen die gestreuten oder Sekundärelektronen eine diskontinuierliche Geschwindigkeitsverteilung zeigten, wenn auch lange nicht so ausgeprägt wie die direkte Strahlung. Versuche dieser Art wurden dann zunächst aufgegeben, und erst nach längerer Zeit auf Grund einer Veröffentlichung von E. Rupp[11]) wieder aufgenommen, in der über die Auslösung von Positronen an Kohle durch Elektronen berichtet wurde. Besonders überraschend war dabei, daß ein sehr intensiver Effekt schon weit unterhalb einer Million Volt, der schon erwähnten untersten Grenze für die Zwillingsbildung, auftreten sollte. Diese Versuche wurden dann mit der schon beschriebenen Apparatur genau nachgeprüft, zum Teil unter direkter Ver-

[11]) Vortrag, gehalten in der Physikalischen Gesellschaft in Berlin.

wendung der Ruppschen Materialien, aber unter wesentlich günstigeren Bedingungen in Bezug auf Spannung und Intensität. Diese Versuche verliefen aber negativ.

Atomzertrümmerung mit Röntgenstrahlen.

Da der Nutzeffekt der Erzeugung von Röntgenstrahlen aus Kathodenstrahlen mit steigender Spannung zunimmt, lösen die hier verwendeten Kathodenstrahlen naturgemäß eine sehr intensive Röntgenstrahlung aus, die noch in einem Abstand von ca. 20 m vom Entladungsrohr und dabei hinter einer Mauer von etwa 50 cm Stärke mit dem Fluorescenzschirm nachweisbar ist.

Von Anfang an wurden Versuche in verschiedener Richtung unternommen, um zu sehen, ob mit diesen Röntgenstrahlen oder direkt mit den Kathodenstrahlen Kerneffekte erzielbar sind. Besonders wurde dabei unter Benutzung von Zählrohren untersucht, ob kurz nach den Entladungsimpulsen von den getroffenen Materialien eine Strahlung ausging, da sich ein ähnlicher Effekt bei der Bestrahlung mit Wasserstoffkanalstrahlen gezeigt hatte[12]). Diese Versuche verliefen aber negativ und wurden nach längerer Unterbrechung erst wieder aufgenommen, nachdem durch die Arbeiten von Chadwick u. Goldhaber, Fermi und Szilard ein konkreter Weg für positive Ergebnisse aufgezeigt war.

Die Arbeiten von Chadwick und Goldhaber[13]) hatten gezeigt, daß überhaupt mit Quanten Kerneffekte erzielbar sind. Der dort mitgeteilte Zerfall des Diplogen in ein Proton und ein Neutron wurde aber erst bei hier nicht erreichbaren Spannungen (2,7 Millionen Volt Gamma-Strahlung von Thorium C) erhalten. Nachgewiesen wurde der Effekt durch die beim Zerfall auftretenden Protonen.

Es lag nun nahe, unter Benutzung der von Fermi und seinen Mitarbeitern[14]) entdeckten Fähigkeit der Neutronen, künstliche Radioaktivität hervorzurufen, das Auftreten von Neutronen als Indikator für einen solchen Zerfall zu benutzen. Dieser Weg wurde von Szilard und Chalmers[15]) gangbar gemacht, besonders durch ihr elegantes Verfahren der Abtrennung der gebildeten radioaktiven Isotopen vom inaktiven Ausgangsmaterial. Ohne dieses Abtrennungsverfahren wäre die Empfindlichkeit des Neutronennachweises auf diesem Wege etwa um den Faktor 10^3 bis 10^4 geringer. Wegen der großen Durchdringungsfähigkeit der Neutronen sind zu ihrer Absorption recht große Substanz-

[12]) Brasch, Naturwissenschaften, 21, 5/6/7 (1933).
[13]) Chadwick und Goldhaber, Nature 134, 237 (1934).
[14]) Fermi und Mitarbeiter, La Ricerca scientifica 5 (I) 5, 283 (1934).
[15]) Szilard und Chalmers, Nature, 134, 462 (1934).

mengen erforderlich, und die Strahlung der Radioaktivität, die darin induziert wird, würde zum überwiegenden Teil natürlich von der Substanz selbst wieder verschluckt.

Bei dem Szilard'schen Abtrennungsverfahren werden die Neutronen von einem Atom absorbiert, das nicht in der konzentrierten Form des freien Elements zur Anwendung kommt, sondern in Form einer stabilen chemischen Verbindung. Z. B. liefern Brom und Jod beim Einfangen eines Neutrons mit sehr hoher Ausbeute ein radioaktives Brom- oder Jodisotop von angenehmer Zerfallszeit, das sich sehr gut für einen Neutronennachweis eignet. (Halbwertszeiten von Brom ca. 6 Stunden und ca. 30 Minuten, von Jod ca. 30 Minuten.) Als chemische Verbindung kamen hier in Frage Bromoform und Aethyljodid. Absorbiert nun der Kern eines gebundenen Halogen-Atoms ein Neutron, so ist dieser Absorptionsprozeß verbunden mit der Emission eines Gamma-Quants von einigen Millionen Volt, und der Rückstoß bei diesem Emissionsprozeß oder der durch das Neutron selbst übertragene Impuls ist ausreichend, um dieses radioaktive Atom aus dem Molekularverband herauszureißen. Trennt man also mit einer geeigneten chemischen Methode das freie Halogen vom gebundenen ab, so hat man in ihm den Träger der Aktivität in einer sehr geringen Substanzmenge enthalten. Isolieren läßt sich das Isotop nicht auf diesem Wege, denn seine Menge ist bisher in allen Fällen so klein, daß sich keinerlei chemische Reaktion mit einer so geringen Substanzmenge ausführen läßt, und dementsprechend wird von vornherein der Halogenverbindung eine winzige Menge freies Halogen zugesetzt.

Will man nun die Kerne der anderen Elemente außer Diplogen auf ihre Zertrümmerbarkeit durch Gamma- oder Röntgenquanten untersuchen, so kommen naturgemäß dafür solche Elemente in Frage, deren Massendefekt klein ist, d. h. deren Kerne möglichst instabil sind. Die Elemente Beryllium und Scandium weisen die kleinsten Massendefekte auf, die nach den bisherigen chemischen Bestimmungen sogar negativ sind, sodaß diese Elemente hiernach instabil sein müßten.

Unter Benutzung der hier geschilderten Neutronennachweismethode konnten Szilard und Chalmers[16]) tatsächlich mit Gammastrahlen am Beryllium einen schwachen Zerfall unter Neutronenauslösung nachweisen. Dann gelang es, mit der hier geschilderten Apparatur mit Röntgenstrahlen im Spannungsbereich oberhalb 1,5 Millionen Volt ebenfalls diesen Zerfall hervorzurufen. Ein Versuch mit Scandium verlief negativ.

Die beim Berylliumversuch erzeugten Aktivitäten wurden unter Benutzung des Fermi'schen Verstärkungseffektes ver-

[16]) Szilard und Chalmers, Nature 134, 494 (1934).

größert. Fermi[17]) hatte ja gefunden, daß die aktivierende Wirkung von Neutronen bei einigen Elementen durch die Gegenwart wasserstoffhaltiger Substanzen zum Teil um den Faktor 100 verstärkt werden konnte. Er deutete den Effekt so, daß wegen der gleichen Masse von Neutron und Wasserstoffkern beim Auftreffen von schnellen Neutronen auf ruhende Wasserstoffkerne ein besonders großer Impulsaustausch stattfindet, und daß diejenigen Elemente, die den Verstärkungseffekt zeigen, besonders gut mit ganz langsamen Neutronen reagieren. Dazu kommt

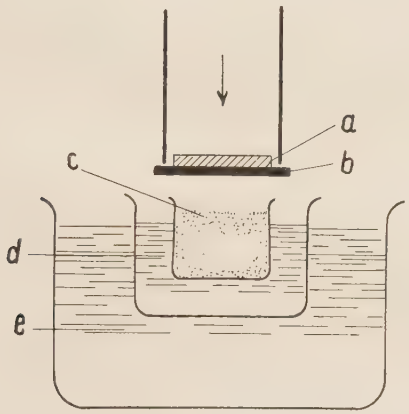


Bild 11.

Schematisches Bild der Versuchsanordnung zur Berylliumzertrümmerung mittels Röntgenstrahlen.

Die im Entladungsrohr beschleunigten Elektronen fallen auf eine Antikathode a (Wolfram von 2 mm Dicke), erzeugen dort Röntgenstrahlen, die ihrerseits darunter angeordnetes metallisches Beryllium c durchsetzen, und dabei Neutronen auslösen. Das Beryllium ist von einer Reaktionssubstanz d (Aethyljodid) umgeben, in der die Neutronen Jodatome zu einer künstlichen Beta-Radioaktivität bringen. Die Neutronen, die diese Flüssigkeit durchsetzt haben, ohne einen Kern zu treffen, werden an einer wasserstoffhaltigen Flüssigkeit e (Wasser oder Oel) verlangsamt und zum Teil in die Reaktionssubstanz zurückgeworfen und rufen dadurch einen Verstärkungseffekt hervor. b ist eine eiserne Abschlußplatte des Rohres.

dann noch, daß eine dicke Schicht wasserstoffhaltiger Substanz ebenfalls wegen dieser großen Impulsübertragung für auffallende Neutronen eine schwerdurchlässige Wand darstellt, die solche Neutronen, die die Reaktionssubstanz durchlaufen haben, ohne eingefangen zu werden, auffängt und zum großen Teil an sie zurückliefert.

Dementsprechend ist bei uns das Bromoform oder Aethyljodid, wie aus Bild 11 zu ersehen ist, in einem größeren Behälter

[17]) Fermi und Mitarbeiter, Ricerca scientifica, 5 (II) 7/8 (1934).

von Oel oder Wasser untergebracht. Obwohl die Schichtdicke des Verstärkers bis zu 10 cm betrug, wurden davon trotzdem noch längst nicht alle Neutronen zurückgehalten, was man daran sah, daß dahinter befindliches Aethyljodid recht merklich aktiviert wurde.

Der Nachweis der Aktivitäten (Betastrahlen) erfolgte mittels dünnwandiger Aluminiumzählrohre (0,1 mm Wandstärke) zuerst im Kaiser-Wilhelm-Institut für Chemie durch die Herren Erbacher und Philipp, und dann an einer eigenen Apparatur. Hier waren ähnliche Zählrohre mit einem AEG-Schnellzählrelais verbunden; hierbei wird die gesamte Verstärkung der Zählstöße durch ein einziges Thyratron vorgenommen und dann auf einen Schnellzähler übertragen, der ein maximales zeitliches Auflösungsvermögen von 30/sec hat und die Gesamtzahl der Zählstöße in bequemer Weise an einem Zeigerwerk abzulesen gestattet.

Diese feineren Beobachtungsmethoden waren aber für die hier erzeugten größeren Aktivitäten nicht brauchbar, die deshalb mit einem gewöhnlichen Betastrahl-Elektroskop — über mehrere Halbwertszeiten hinweg — verfolgt werden konnten. Solche Präparate wurden später wiederholt auf dem Luftwege nach London geschickt und konnten dort von Szilard und seinen Mitarbeitern weiter untersucht werden.

Es wurde dann untersucht, ob Beryllium auch Neutronen emittiert beim direkten Auftreffen schneller Kathodenstrahlen. Hierzu wurde in der gleichen Weise mit der Aktivierung von Brom und Jod gearbeitet, und es zeigte sich, daß die erhaltene Aktivität bei der direkten Bestrahlung des Berylliums wesentlich geringer war, als wenn die Kathodenstrahlen auf eine Wolfram-Antikathode fielen, entsprechend dem geringeren Nutzeffekt der Erzeugung von Röntgenstrahlen bei der erheblich geringeren Ordnungszahl von Beryllium als Antikathodenmaterial. Es muß also gefolgert werden, daß, wenn ein eventueller Zerfall des Berylliums unter dem Einfluß der Kathodenstrahlen vorkommt, er jedenfalls klein ist im Vergleich zum Zerfall bei der Röntgenbestrahlung. Dazu kommt dann noch, daß dabei die Energie der Röntgenstrahlen gegenüber den Kathodenstrahlen klein ist, und außerdem die Kathodenstrahlen ihre Energie im bestrahlten Beryllium ganz abgeben, während bei Röntgenstrahlen außer hinzukommenden Raumwinkel-Verlusten die Absorption nur recht unvollkommen ist.

Bei Verwendung von ca. 500 g metallischen Berylliums und bei 100 Impulsen von 1,9 Millionen Volt und Wolframantikathode ließ sich eine Aktivität entsprechend $^1/_{100}$ mg Radium induzieren. Bei einem Strompreis von 1 Pfennig pro Kilowattstunde würde dabei die Aktivität eines Milligramm etwa 30 Pfennig an Stromkosten betragen.

Die Oekonomie des Verfahrens ist aber sehr erheblich steigerungsfähig schon durch Verwendung größerer Substanzmengen, ganz besonders aber durch verhältnismäßig unerhebliche Erhöhung der Betriebsspannung. Denn es zeigte sich, daß bei einer Spannungssteigerung von 1,5 auf 1,9 Millionen Volt der Nutzeffekt etwa um den Faktor 10^6 ansteigt. Dies ist dadurch verständlich, daß der Intensitätsabfall des kontinuierlichen Röntgenspektrums an der Einstein'schen Grenze recht steil ist, und der Energieinhalt der Strahlung oberhalb 1,5 Millionen Volt (der ungefähren Grenze der Nachweisbarkeit des Berylliumzerfalls) also mit Erhöhung der Betriebsspannung sehr stark anwächst. Es kommt hinzu, daß bei größerer Härte der Röntgenstrahlung der Nutzeffekt des Berylliumzerfalls, der hier ungefähr 1 pro Mille betragen dürfte, ebenfalls zunimmt.

Die Herstellung radioaktiver Substanzen mittels Neutronen scheint heute reif geworden zu sein, auch für eine Bearbeitung vom technischen Gesichtspunkt aus. Hierbei muß noch offen bleiben, ob die Auslösung der Neutronen, wie hier, durch Röntgenstrahlen an Beryllium oder nach der im Rutherfordschen Laboratorium ausgearbeiteten Methode vorzuziehen ist. Bei dieser Methode werden die Neutronen erzeugt durch Bombardement von Diplogen auf Diplogen bei einigen hunderttausend Volt. Dieser letzteren Methode liegt die Reaktionsgleichung zu Grunde:

$$ {}_1H^2 + {}_1H^2 \rightarrow {}_2He^3 + {}_0n^1 $$

Hierbei entstehen recht schnelle Neutronen. Will man sie in größerem Umfange anwenden, so sind wohl noch einige technische Schwierigkeiten bei der dann notwendigen Herstellung sehr intensiver Kanalstrahlen zu überwinden. Bei der hier benutzten Methode werden zunächst im Entladungsrohr schnelle Elektronen erzeugt, was auch bei beliebig groß verlangten Intensitäten keine Schwierigkeiten mehr bereitet.

Erzeugung von Kanalstrahlen und deren Anwendung.

Wie schon erwähnt, ist die Erzeugung von Wasserstoffkanalstrahlen nach der Stoßmethode insofern mit Schwierigkeiten verbunden, als es hier nötig ist, sehr große Emissionsströme zur Verfügung zu haben. Es wurde versucht, die Emission der Kanalstrahlen ebenfalls stoßweise vorzunehmen. Es erwies sich schließlich als das Vorteilhafteste, organische Substanzen auf die Antikathode zu bringen, die im Stoßmoment durch die Kathodenstrahlen explosionsartig zur Verdampfung gebracht werden und dann zur intensiven momentanen

H-Strahlenquelle werden. Begrenzt ist deren Intensität dann im Wesentlichen durch die Leistungsfähigkeit des Stoßgenerators bei Berücksichtigung der Tatsache, daß die Beweglichkeit der H-Teilchen entsprechend dem Massenverhältnis sehr gering zu der der Elektronen ist und man also maximal eine Intensität von größenordnungsmäßig einem Tausendstel der Kathodenstrahlung erhalten kann. Nach der erwähnten Methode gelang es tatsächlich, Kanalstrahlen von der Größenordnung einiger Ampere Momentanstromstärke zu erhalten und in entsprechender Weise wie bei Elektronen die Intensität kalorimetrisch zu messen (Goldmann).

Ein Nachteil dieser Form der Erzeugungsmethode liegt naturgemäß darin, daß eine so starke Verdampfung und auch Zerstäubung von organischen Substanzen wie z. B. Paraffin schon nach kurzem Betrieb zu einer sehr starken Verunreinigung des Entladungsrohres führt. Dieser Nachteil macht sich besonders beim Hartpapierlamellenrohr unangenehm bemerkbar, das sich nicht oder zum mindesten sehr schwer reinigen läßt, und dann einen Neuaufbau des Rohres notwendig macht. Wenn auch die keramischen Röhren eine Reinigung wesentlich leichter zulassen und vorzugsweise im Hinblick auf die Möglichkeit der Reinigung als Material für die Metallringscheiben V 2 A-Stahl gewählt wurde, so bleibt doch das Bedürfnis bestehen, Verunreinigungen zum mindesten in der zunächst auftretenden großen Menge zu vermeiden. Hierzu wurde als organische Substanz eine Flüssigkeit sehr hohen Dampfdruckes wie z. B. Pentan oder ein verhältnismäßig leicht kondensierbares Gas gewählt, bei gleichzeitiger Verwendung einer Antikathode, die auf der Temperatur der flüssigen Luft gehalten wurde. Wenn im Stoßmoment jetzt eine noch so starke Verdampfung oder Zerstäubung der wasserstoffhaltigen Substanz erfolgt, so findet doch kein Niederschlag an der Wand des Rohres statt, sondern die dort auftreffenden Gas- oder Flüssigkeitsmengen verdampfen sofort und schlagen sich zum überwiegenden Teil an der Antikathode wieder nieder oder werden auch von der Pumpapparatur abgefördert.

Will man mit den Kanalstrahlen Atomzertrümmerungsexperimente ausführen, so liegt eine sehr große Schwierigkeit darin, daß die Erzeugung verhältnismäßig schwacher Kanalstrahlen über den Umweg sehr intensiver Kathodenstrahlen geht, die ihrerseits eine so intensive und durchdringende Röntgenstrahlung erzeugen, daß hierdurch ein Nachweis von Atomtrümmern nach allen Beobachtungsmethoden sehr erschwert ist.

Beseitigen ließ sich diese Störungsquelle dadurch, daß alle Teile des Rohres aus möglichst leichtatomigem Material hergestellt wurden, auf die Kathodenstrahlen treffen oder an denen

Röntgenstrahlen zur Stelle, an der Atomtrümmer nachgewiesen werden sollen, hingestreut werden. Außerdem wurde von der Tatsache Gebrauch gemacht, daß in dem hier interessierenden Spannungsbereich die Emission der Röntgenstrahlen — gesehen von der Richtung der erzeugenden Kathodenstrahlen — vorzugsweise nach vorn erfolgt und nur sehr wenig Röntgenquanten in entgegengesetzter Richtung laufen. Der Entladungskanal des Lamellenrohres wurde daher durch eingesetzte Blenden stark verengt (auf etwa 2—3 cm), sodaß die Antikathode von einem möglichst parallelen Strahlenbündel bei verhältnismäßig kleinem

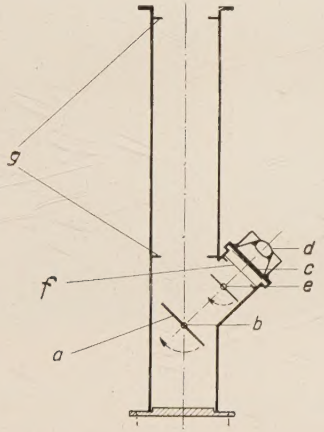


Bild 12.

Apparatur für Zertrümmerungen mittels Kanalstrahlen.

Die aus dem Entladungsrohr in die Apparatur einfallenden Kanalstrahlen treffen nach Ausblendung (g) auf einen Lithiumschirm a, der um einen Schliff b drehbar angeordnet ist. Ein Teil der im Lithium entstandenen Trümmer erregt auf dem Zinksulfidschirm c Scintillationen, die durch ein Linsensystem d beobachtbar sind. Zwischen Leuchtschirm und Lithiumscheibe sind fest oder auf einem drehbaren Rahmen e (Absorptions-) Folien f aufgespannt, die während der Versuche zur Absorptionsmessung quer in den Strahlengang gebracht werden können.

Querschnitt getroffen wurde, und so in entgegengesetzter Richtung ein von harter Röntgenstrahlung freier Raumwinkel entstand. Die Kanalstrahlen fielen entsprechend Bild 12 auf die zu untersuchende Substanz, und auf einem Scintillationsschirm wurden die Atomtrümmer retrograd beobachtet.

Beim Lithium konnten bis zu 10^7 Trümmer (Alpha-Teilchen) pro Impuls erhalten werden. Wegen der geschilderten Schwierigkeiten erwies sich diese Methode aber doch nicht sehr geeignet für systematische und quantitative Arbeiten. Wie schon

Brasch und Lange mitteilten[18]), zeigten sich bei solchen Versuchen kurz nach den Stößen noch Scintillationen, die von den Verfassern als kurzlebige künstliche Radioaktivität der bestrahlten Substanzen gedeutet wurden.

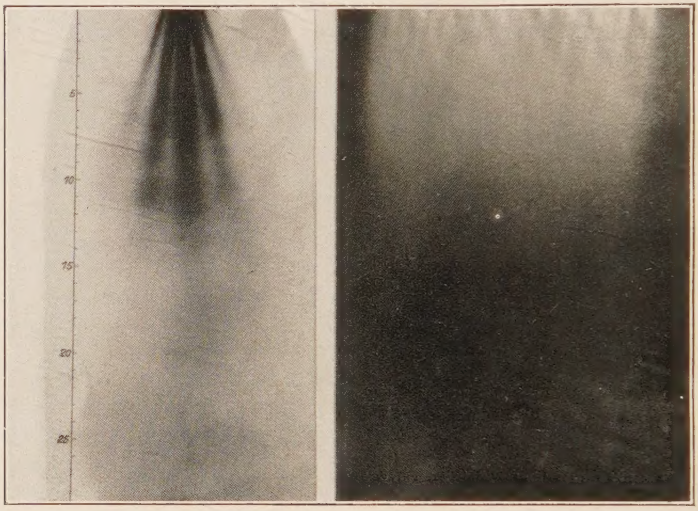


Bild 13 und 14.

Ausbreitung von Kathoden- und Kanalstrahlen in Luft.

Man sieht, daß die Struktur des Austrittsfensters bei Kanalstrahlen nahezu bis ans Ende der Bahn erhalten bleibt, während bei Kathodenstrahlen schon nach einem sehr kleinen Bruchteil der Bahn die Struktur in Luft verwaschen ist. Das Bild der Kathodenstrahlen gibt nur einen sehr kleinen Teil ihrer Bahn wieder (Gesamtlänge bis zu 30 cm), die hier in Luft eine Reichweite von etwa 7 m haben. Das rechte Bild (Kanalstrahlen) ist in natürlicher Größe wiedergegeben.

Zusammenfassung.

1. Es werden einige Mängel des Lamellenrohres und seines Betriebes am Stoßgenerator diskutiert und Verbesserungen der betreffenden Konstruktionen angegeben, wodurch besonders eine größere Konstanz des Betriebes erreicht wird.
2. Es werden verschiedene Methoden zur Intensitätsmessung für in solchen Röhren erzeugte Kathodenstrahlen von ca. 2 Millionen Volt experimentell untersucht.

[18]) Brasch, Naturwissenschaften, 5/6/7, 82 (1933).

3. Die Eigenschaft schneller Elektronen, bei durchstrahltem Material mehr Energie in einer gewissen Tiefe als an der Oberfläche abzugeben, wird näher untersucht.
4. Die Geschwindigkeitsverteilung solcher Kathodenstrahlen wird untersucht.
5. Die Frage der Auslösung von Positronen mittels schneller Elektronen wird geprüft; hierbei zeigt sich mit Sicherheit bis zu 1,8 Millionen Volt keine Positronenintensität, die photographisch nachweisbar ist.
6. Es wird ein Kernzerfall des Berylliums bei der Bestrahlung mit Röntgenstrahlen oberhalb 1,5 Millionen Volt erhalten.
7. Es wird die Erzeugung von Wasserstoffkanalstrahlen im Lamellenrohr verbessert.

Die vorliegende Arbeit wurde zum größten Teil in den Laboratorien der AEG ausgeführt, und zwar im Hochspannungslaboratorium der Transformatorenfabrik in Oberschöneweide und auch im Forschungsinstitut in Reinickendorf. Ein Teil der ersten Arbeiten erfolgte im Physikalischen Institut der Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin.

Den Herren Brasch und Lange danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit sowie für ihre Mithilfe bei der Durchführung vieler Experimente.

Lebenslauf.

Ich wurde am 13. März 1910 als Sohn des Lektors am Orientalischen Seminar der Berliner Universität, Dr. med. Hamed Waly, zu Berlin-Wilmersdorf geboren, und bin ägyptischer Staatsangehöriger. Nach dem Tode meines Vaters im Jahre 1912 blieb ich in Deutschland und besuchte von Oktober 1918 an das Heinrich von Kleist-Realgymnasium bis zu meiner Ostern 1929 bestandenen Reifeprüfung. Darauf studierte ich an der Technischen Hochschule Charlottenburg Physik und Mathematik, und seit Herbst 1930 an der Berliner Universität Physik. Mit der vorliegenden Arbeit war ich seit Herbst 1932 beschäftigt.

Adnan W a l y.